



⑪ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 24 080 A 1**

⑤① Int. Cl.⁷:
A 61 F 9/008

②① Aktenzeichen: 100 24 080.1
②② Anmeldetag: 17. 5. 2000
④③ Offenlegungstag: 22. 11. 2001

DE 100 24 080 A 1

⑦① Anmelder:
ASCLEPION-MEDITEC AG, 07745 Jena, DE

⑦④ Vertreter:
DTS München Patent- und Rechtsanwälte, 80538
München

⑦② Erfinder:
Dick, Manfred, Dr., 07926 Gefell, DE; Mäusezahl,
Holger, 07745 Jena, DE; Fiedler, Joachim, 74564
Crailsheim, DE; Schröder, Eckhard, 90542 Eckental,
DE; Molebny, Vasyl, Prof., Kiev/Kiev, UA

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤④ Verfahren und Vorrichtung zur vollständigen Korrektur von Sehfehlern des menschlichen Auges

⑤⑦ Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur vollständigen Korrektur von Sehfehlern des menschlichen Auges. Es wurden Kombinationen von Meß- und Bearbeitungsverfahren angegeben, welche in ihrer erfindungsgemäßen Anwendung die vollständige Korrektur des menschlichen Auges ermöglichen. Dabei werden Meßverfahren eingesetzt, welche die Oberfläche der Cornea präzise erfassen können und auch die im weiteren Strahlengang bis zur Netzhaut entstehenden Abbildungsfehler registrieren. Die rechnergestützte Auswertung dieser Meßergebnisse ergibt in Verbindung mit der Berechnung ideal korrigierter Augenlinsen (beispielsweise nach Katarakt-Operationen) oder ideal korrigierender Corneaoberflächen die Möglichkeit, bevorzugt mit einem Spot-Scanning-Excimerlasersystem topographiegestützt eine patientenspezifische Linse herzustellen und/oder die Hornhaut ideal korrigierend zu formen.

DE 100 24 080 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Korrektur von Sehfehlern des menschlichen Auges.

[0002] In der Ophthalmologie ist es bekannt, die Hornhaut bei Sehschwäche durch Ablation von Gewebe zu formen. Die Daten über die Aberration im Strahlengang des Auges werden dabei über eine Befragung des Patienten aufgrund von Korrekturen über standardisierte Korrekturlinsen vor dem Auge des Patienten nach seinem subjektiven Eindruck des Sehvermögens gewonnen. Daneben existieren Verfahren zur Vermessung der äußeren Kontur des Auges mittels Streifen- oder Ringprojektionssystemen, wie sie beispielsweise von den Firmen Orbtek, Tomey oder Technomed hergestellt werden.

[0003] In der DE 197 05 119 A1 wird ein Verfahren zur Verbesserung eines Shack-Hartmann-Sensors beschrieben, mit dem Wellenfronten im Bereich der Astronomie zur Vermessung von Sternen gemessen werden können.

[0004] In der DE 197 27 573 C1 wird in einem wertvollen Beitrag zum Stand der Technik eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Formgebung von Oberflächen, insbesondere von Linsen, vermittelt einer Laserabtragung der Oberflächen angegeben.

[0005] Nachteilig am Stand der Technik wird die Tatsache empfunden, daß die Korrektur der Linsen nur aufgrund suboptimaler Daten über die Ursachen der Sehfehler wie Irregularitäten der Hornhautoberfläche oder Aberration im Strahlengang stattfindet. Es werden folglich nur Korrekturen entsprechend den Standardlinsenformeln der geometrischen Optik ausgeführt.

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung war es daher, ein Verfahren und eine Vorrichtung bereitzustellen, die eine vollständige Korrektur aller refraktiven Sehfehler einschließlich der Aberrationen des Strahlenganges im fehlerhaften Auge erlauben.

[0007] Diese Aufgabe wird durch die Vorrichtung und das Verfahren nach den unabhängigen Ansprüchen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0008] Insbesondere wird die Aufgabe durch eine Vorrichtung zur Korrektur von Sehfehlern eines Auges gelöst, umfassend eine kohärente Lichtquelle, eine Strahlmodifikationseinrichtung zur Formung und Ablenkung eines Strahles der kohärenten Lichtquelle, wobei eine Wellenfrontanalyseeinrichtung zur Analyse einer Wellenfront des Strahlenganges im Auge vorgesehen ist. Durch diese Vorrichtung ist es möglich, die aus der Analyse der intraokularen Aberration gewonnenen Daten in die Korrektur eines bestehenden optischen Systems eines zu korrigierenden Auges einfließen zu lassen. Damit wird die Korrektur des optischen Systems des Auges nochmals präziser möglich.

[0009] Als Auge kommt insbesondere ein menschliches Auge in Betracht, denkbar ist aber auch die Korrektur von Augen anderer Lebewesen. Sehfehler sind insbesondere refraktive Sehfehler wie die Kurz- oder Weitsichtigkeit, Irregularitäten der Hornhautoberfläche oder Aberrationen im Strahlengang.

[0010] Als kohärente Lichtquelle ist bevorzugt ein Laser, besonders bevorzugt ein refraktiver Laser, insbesondere bevorzugt ein Spot-Scanning-Excimerlasersystem, vorgesehen. Daneben kann auch an ein Spot Scanner mit Laserlicht in anderen Bereichen des Spektrums gedacht werden wie ein frequenzverfünftelter YAG-Laser, ein IR-Laser bei 3 µm, wie bspw. einen Erbium:YAG-Laser, der bei 2,94 µm emittiert, oder ein femto-Sekundenlaser (FS-Laser).

[0011] Die Strahlmodifikationseinrichtung besteht be-

vorzugt aus einer Einrichtung zur Formung eines Strahles und einer Einrichtung zur Ablenkung und Ausrichtung des Strahles. Als Einrichtung zur Formung des Strahles werden bevorzugt Linsensysteme, diffraktive Strukturen und refraktive Elemente eingesetzt. Als Einrichtung zur Ablenkung und Ausrichtung des Strahles werden bevorzugt Scanneranordnungen, Prismen und Spiegel verwendet.

[0012] Als Wellenfrontanalyseeinrichtung kann bevorzugt ein Shack-Hartmann-Sensor verwendet werden. Hierbei handelt es sich um einen Sensor, der auf einem Verfahren beruht, um Wellenfronten zu analysieren. Er wird insbesondere in der Astronomie eingesetzt (s. o.). Durch diese Wellenfrontanalyseeinrichtung kann die gesamte aus dem Auge austretende Wellenfront gemessen werden und so Informationen über die Sehfehler einschließlich der intraokularen Aberration des Strahlenganges auch im Auge gewonnen werden.

[0013] Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung vorgesehen, bei der zusätzlich eine Topographieanalyseeinheit zur Analyse der Oberfläche des Auges vorgesehen ist. Diese Analyse liefert die Information, welche Krümmung und Kontur die Augenoberfläche – also insbesondere die Cornea – aufweist. Dadurch stehen dem System die vollständigen Daten über die refraktiven Sehfehler des Auges zur Verfügung. Sowohl die gegebenenfalls nicht ideale Oberflächenkontur des Auges- bzw. der Cornea- als auch die intraokulare Aberration kann nun analysiert werden und stehen dem System bei der Korrektur des optischen Systemes des Auges zur Verfügung. Dadurch ist es möglich, die Sehfehler des Auges vollständig zu korrigieren und sogar ein Sehvermögen zu erreichen, das über dem des normalen menschlichen Auges liegt.

[0014] Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung ist eine Vorrichtung vorgesehen, bei der weiterhin eine Steuereinheit zur Verarbeitung von Signalen der Wellenfrontanalyseeinheit und/oder zur Verarbeitung von Signalen der Topographieanalyseeinheit, und/oder zur Steuerung der kohärenten Lichtquelle und/oder zur Steuerung der Strahlmodifikationseinrichtung vorgesehen ist. Durch diese Steuereinheiten können die durch die Analyseeinheiten ermittelten Daten ausgewertet werden. Es ist möglich, die Signale der Wellenfrontanalyseeinheit und der Signale der Topographieanalyseeinheit in der Steuereinheit getrennt zu verarbeiten und auszuwerten oder beide Datenmengen in einem Schritt zu verarbeiten. Die Steuereinheit besteht bevorzugt aus mehreren einzelnen Steuereinheiten.

[0015] Diese Daten dienen bevorzugt der Bereitstellung eines idealen optischen Systemes. Aus diesen Daten werden die für die Strahlmodifikation erforderlichen Parameter bestimmt. Diese Parameter können bevorzugt in einem weiteren Schritt zur Steuerung der kohärenten Lichtquelle benutzt werden, um beispielsweise Amplitude, Pulsdauer und Energie des Strahles vorzubestimmen. Weiterhin bevorzugt werden diese Parameter auch zur Steuerung der Strahlmodifikationseinrichtung eingesetzt, um hier über die Ablenkung des Strahles den Zielort und die Geometrie des Strahles im Ziel festzulegen.

[0016] Dadurch können bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel insbesondere die Schußpositionen für die Herstellung der einzelnen Elemente berechnet werden.

[0017] Bei einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist eine Vorrichtung vorgesehen, bei der die Strahlmodifikationseinrichtung so ausgebildet ist, daß mit dem Strahl eine Intraokularlinse und/oder eine Augenlinse und/oder die Cornea des Auges und/oder eine Kontaktlinse und/oder eine implantable Contact lens (ICL) und/oder ein Brillenglas bearbeitbar ist. Durch den bevorzugt von der Steuereinheit gesteuerten Strahl kann nun

ein Element bzw. Werkstück des Linsensystems derart bearbeitet werden, daß die Sehfehler bzw. Aberration vollständig korrigiert wird. Ein solches Element ist bevorzugt eine Intraokularlinse (IOL), die vor einer entsprechenden Operation vorgefertigt wird. Besonders bevorzugt handelt es sich um eine ICL (implantable contact lens), die auf die Linse aufgesetzt wird. Diese IOL bzw. ICL kann dann aufgrund der gesamten vorliegenden Information über die Sehfehler einschl. der Aberration des Auges so geformt werden, daß sie alle vorhandenen Sehfehler korrigiert. Denkbar ist auch, die Korrektur mittels des bevorzugt durch die Steuereinrichtung gesteuerten Strahles an der Augenlinse selbst vorzunehmen.

[0018] Weiterhin ist es denkbar, eine Korrektur durch die Bearbeitung der Cornea vorzunehmen. Bevorzugt werden auch Kontaktlinsen gefertigt, die patientenspezifisch sämtliche individuellen über dem refraktiven Augenfehler hinausgehende Fehler wie Aberrationen, unsymmetrische Zylinder und Hornhaut-Irregularitäten korrigieren. Daneben ist es möglich, individuelle Brillengläser herzustellen. Hierfür können neben der Excimer-Spot-Bearbeitung auch Methoden der Optikindustrie wie beispielsweise das single point diamond turning Verfahren eingesetzt werden. Hierdurch können sämtliche Elemente des betroffenen optischen Systems zur Korrektur der Augenfehler verwendet werden.

[0019] Es ist ebenfalls möglich, eine Kombination der einzelnen (teil-) korrigierten Elemente einzusetzen. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn die theoretisch mögliche Korrektur über ein Element zu einer hohen Beanspruchung dieses Elements führen würde und eine solche Beanspruchung insbesondere aus medizinischer Sicht nicht angezeigt erscheint.

[0020] Die Aufgabe wird weiterhin gelöst durch ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Korrektur von Sehfehlern eines Auges, wobei der Strahlengang des Auges mittels einer Wellenfrontanalyse ermittelt wird und ein ideales Linsensystem berechnet wird, das zu einer Korrektur der Sehfehler des Auges führen würde. Besonders bevorzugt wird dieses Verfahren unter Einsatz einer erfindungsgemäßen Vorrichtung angewandt. Bei diesem Verfahren steht für die Berechnung der Korrektur des optischen Systems zur Überführung in ein ideales optisches System die intraokulare Aberration des Strahlenganges zur Verfügung.

[0021] Besonders bevorzugt wird bei einem weiteren erfindungsgemäßen Verfahren zusätzlich die Topographie des Auges analysiert. Damit stehen in diesem Verfahren noch weitere Informationen über die Fehlsichtigkeit des Auges zur Verfügung, insbesondere über Aberrationen, unsymmetrische Zylinder und Hornhaut-Irregularitäten.

[0022] Bei einem weiteren bevorzugten Verfahren wird das ideale optische System auf der Basis der aus der Wellenfrontanalyse und/oder der aus der Topographieanalyse ermittelten Daten bereitgestellt. Besonders bevorzugt wird dafür nur ein Element aus diesem optischen System bereitgestellt. Auf diese Weise wird in einem weiteren Schritt das korrigierende Element oder die korrigierenden Elemente auf der Basis der kompletten Daten der Fehlsichtigkeit hergestellt. Dieses Vorgehen führt so zur vollständigen Korrektur der Fehlsichtigkeit.

[0023] Bei einem weiteren bevorzugten Verfahren werden Schußpositionen zur Herstellung des idealen optischen Systems mittels der aus der Wellenfrontanalyse und/oder aus der Topographieanalyse ermittelten Daten berechnet. Auf diese Weise kann vorteilhaft das Laser-Spot-Excimer-Verfahren zur Herstellung der einzelnen Elemente des optischen Systems genutzt werden. Die Schußpositionen werden je nach einzusetzenden Materialien und unter Berücksichtigung des Fertigungszeitaufwandes optimiert.

[0024] Bei einem weiteren Verfahren der vorliegenden Erfindung wird das alte optische System des Auges zu dem berechneten idealen optischen System umgeformt. Hierzu werden entweder Elemente des alten optischen Systems direkt bearbeitet oder entsprechend korrigierte Elemente hergestellt und eingesetzt bzw. alte Elemente gegen neue Elemente ausgetauscht. Durch dieses Verfahren ist die Überführung des alten (fehlsichtigen) optischen Systems des Auges in ein (neues) ideales optisches System möglich. Besonders bevorzugt wird eine neue Linse bzw. eine ICL nach dem Spot-Scanning-Prinzip mit einem Excimerlaser hergestellt.

[0025] Bevorzugt umfaßt das optische System als Elemente die Augenlinse und/oder eine Intraokularlinse und/oder die Cornea des Auges und/oder eine Kontaktlinse und/oder eine ICL und/oder mindestens ein Brillenglas. Mittels refraktiver Chirurgie kann beispielsweise die Cornea des Auges umgeformt werden, um die bestehende Fehlsichtigkeit zu korrigieren (z. Bsp. die Oberfläche der Cornea über die Photorefraktive Keratektomie, PRK, oder durch Ablation innerer Gewebeschichten der Cornea durch die Laser assisted in situ Keratomileusis, LASIK). Diese Elemente weisen nicht nur rotationsgeometrische Korrekturen auf, sondern individuelle Strukturen zur Korrektur der Fehlsichtigkeit der Patienten. So ist es möglich, Intraokularlinsen oder Kontaktlinsen, insbesondere ICL'S, herzustellen, die – einmal in das Linsensystem eingebracht – nicht nur wie bisher die Fehlsichtigkeit des Auges grob korrigieren, sondern darüber hinaus alle Irregularitäten, Unsymmetrien und Strahlverzerrungen mitkorrigieren. Damit kaum ein visus erreicht werden, der über dem des normalen menschlichen Auge liegt. Außerdem ist es mit diesem Verfahren möglich, Brillengläser herzustellen, die ebenfalls alle Irregularitäten, Unsymmetrien und Strahlverzerrungen des fehlsichtigen Auges bzw. des alten optischen Systems mitkorrigieren.

[0026] In einem besonders bevorzugten Verfahren der vorliegenden Erfindung werden einzelne optische Elemente, insbesondere Linsen, des idealen optischen Systems in einem ersten Schritt zur Überprüfung des idealen optischen Systems hergestellt und in einem zweiten Schritt werden diese einzelnen Elemente entfernt und andere Elemente, insbesondere die Cornea, entsprechend umgeformt. Durch dieses Verfahren kann die Akzeptanz erhöht werden, da die einmal ermittelten Schußpositionen nun auf ein optisches Element wie bspw. eine Linse aufgebracht werden können und diese (geplante) Korrektur sofort den Eindruck vermittelt, wie das vollständig korrigierte Auge später sehen würde. Der Betrachter ist nun in der Lage, die Wirkung eines entsprechenden korrigierten optischen Systems subjektiv zu überprüfen und das korrigierte Sehverhalten bzw. sogar einen Supervisus noch vor einem Eingriff an der Cornea zu bewerten. In einem zweiten Schritt kann dann diese Linse aus dem idealen optischen System entfernt werden und bevorzugt die Cornea dann ideal geformt werden, um den entsprechenden korrigierten Visus bereitzustellen. Bevorzugt handelt es sich bei dem provisorischen optischen Element um eine Linse, die dem Betrachter dann auf einem provisorischen Brillengestell in das optische System eingefügt werden kann. Besonders bevorzugt handelt es sich bei dem Material, das das Schußmuster vorerst aufgebracht wird, um eine feuchte Kontaktlinse. Dabei ist es besonders günstig, diese Kontaktlinse so auszuwählen, dass die sphärozyklindrischen Aberrationen des zu behandelnden Patienten bereits mit dieser Linse korrigiert werden. Mit dem Behandlungslaser sind dann nur die vorher gemessenen höheren Aberrationen auf dieser Kontaktlinse zu korrigieren. Besonders vorteilhaft weist die weiche Kontaktlinse eine Brechkraft und Ablationseigenschaft auf, die weitgehend der der Cornea entspricht. Dadurch werden die Schußpositionen des provi-

sonischen optischen Elements später dem eigenen optischen Element, insbesondere der Cornea, entsprechen. Vorteilhafterweise wird das provisorische optische Element, insbesondere die Kontaktlinse, zentrisch ausgerichtet und Referenzachsen der Wavefront-Messung, sowie die Achse des Auges stimmen überein. Die Verwendung von Materialien wie bspw. PMMA als Ablationsmaterial des provisorischen optischen Elements wird bevorzugt. Hierbei wird insbesondere auch im Vergleich dieses Materials zur Cornea neben der differierenden Abtragtiefe auch die unterschiedliche Brechzahl beider Medien berücksichtigt. Da dies konstante Faktoren sind, können diese mathematisch sehr gut erfasst und transformiert werden.

[0027] Durch dieses Verfahren ist es möglich, eine provisorische Linse mit den Daten zu schießen, die dieselbe Wellenfrontkorrektur erzeugt, wie eine etwaige beabsichtigte spätere Umformung der Cornea. Hierzu wird bevorzugt eine Linse auf einem Gestell bereitgestellt, so daß kein Kontakt dieser Linse mit dem Auge erforderlich ist. Besonders bevorzugt erfolgt die Herstellung der (provisorischen) Linse während der Messung der Wellenfront im optischen System. Hierbei wird bevorzugt iterativ die provisorische Linse bearbeitet und dann nochmals die Wellenfront nachgemessen, bis keine Aberration des Gesamtsystems mehr festgestellt werden kann. Besonders bevorzugt wird bei einem solchen Vorgehen das Auge des Patienten fixiert, beispielsweise durch ein Fadenkreuz. Denkbar ist es auch, den Abstand der provisorischen Linse zur Cornea auf Null zu führen und mit einer Kontaktlinse auf dem Auge zu arbeiten, die dann besonders bevorzugt iterativ bearbeitet wird, während sie auf dem Auge liegt. Bevorzugt wird die Bearbeitung nach Durchführung entsprechender Teilbearbeitungsschritte unterbrochen, um einen Sehtest durchzuführen. Damit ist ein iteratives Annähern an den besten Visus mit unmittelbarer Hilfe des Patienten und der Benutzung des Excimerlasers möglich. Besonders bevorzugt werden die Aberrationen verschiedener Ordnung einzeln verbessert: 1. Astigmatismus, 2. Koma, 3.

[0028] Weiterhin wird die Aufgabe gelöst durch ein ideales optischen System, das nach einem erfindungsgemäßen Verfahren und/oder mittels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung hergestellt wurde, wobei das optische System Elemente aus implantationsgerechten und/oder adhäsionsgerechten und/oder ablationsgeeigneten Werkstoffen, insbesondere Kunststoff oder Glas, umfaßt. Durch die Wahl dieser Werkstoffe des erfindungsgemäßen Linsensystems ist die Verträglichkeit beim Einsatz dieser Elemente gewährleistet. Solche Werkstoffe sind beispielsweise PMMA, Acryl, Silikon oder eine Kombination dieser Werkstoffe.

[0029] Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung ist ein ideales optisches System vorgesehen, das Elemente umfaßt, die refraktive und/oder diffraktive Strukturen umfassen. Refraktive und/oder diffraktive Strukturen werden bisher nur in der Strahlformung verwendet. Ein Minilinsensystem lenkt und formt den eintretenden Strahl, um eine spezielle Strahlverteilung in der Zielebene zu erreichen. Der Einsatz derartiger refraktiver und/oder diffraktiver Strukturen auf einzelnen Elementen eines optischen Systems erlaubt die gezielte Korrektur von Sehschwächen in ungewöhnlich idealer Weise. So ist es durch den Einsatz dieser Strukturen möglich, einzelne nicht stetige Aberrationen zu korrigieren oder aber auch den optischen Systemen Eigenschaften zu verleihen, die ein normales menschliches Auge nicht aufweist.

[0030] Die Aufgabe der Erfindung wird weiterhin durch ein Element eines (idealen) Linsensystemes gelöst, das refraktive und/oder diffraktive Strukturen aufweist. Solche Elemente können Intraokularlinsen, modifizierte Cornea,

Kontaktlinsen, ICL's oder Brillengläser sein.

[0031] Ausführungsbeispiele der Erfindung und vorteilhafte Ausgestaltungen sollen im Folgenden anhand von Zeichnungen näher erläutert werden. Dabei zeigen:

[0032] Fig. 1 ein Blockschaltbild für ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Korrektur einer Aberration im Strahlengang eines Auges.

[0033] Fig. 2 eine schematische Darstellung einer Anordnung zur separaten Sehfehlererfassung (Fig. 2a) und einer Anordnung bei Superposition aller Fehler (Fig. 2b).

[0034] In Fig. 1 ist ein Blockschaltbild für ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Korrektur von Sehfehlern eines Auges dargestellt. Eine Wellenfrontanalyseeinheit 2 und eine Topographieanalyseeinheit 2' sind mit einer Steuereinheit 3 verbunden. Die Steuereinheit 3 ist über einen Bus mit einem Laser 4 und einer Strahlmodifikationseinrichtung 5 verbunden. Hinter der Strahlmodifikationseinrichtung 5 ist eine Linse 6 dargestellt. Vor der Wellenfrontanalyseeinheit 2 und der Topographieanalyseeinheit 2' ist ein Auge 1 dargestellt.

[0035] Im Betriebszustand tasten die Strahlen der Wellenfrontanalyseeinheit 2 und der Topographieanalyseeinheit 2' das Auge 1 ab und übermitteln die gewonnenen Signale an die Steuereinheit 3. In der Steuereinheit 3 werden die Signale verarbeitet und das ideale optische System für dieses Auge 1 berechnet. Im dargestellten Fall wird hier als Element des optischen Systems eine ideale Linse 6 berechnet. Insbesondere werden in der Steuereinheit 3 ausgehend von den aus den Signalen gewonnenen Daten unter Berücksichtigung der laserrelevanten Daten sämtliche Schußpositionen berechnet, die für den Laser 4 zur Herstellung der idealen Linse 6 benötigt werden. Die Steuereinheit 3 steuert daraufhin den Laser 4 an und bestimmt Energie und Pulsrate des Strahles 7. Der Strahl 7 wird durch die Strahlmodifikationseinrichtung 5 geleitet. In der Strahlmodifikationseinrichtung 5 wird der Strahl 7 gemäß den berechneten Schußpositionen durch die Vorgaben der Steuereinheit 3 über Scanner und Linsensysteme geformt und abgelenkt, so daß durch Ablation von Material auf der Rohlinse durch den gesteuerten Laserstrahl 7 die kundenspezifische Linse 6 hergestellt wird. Die Steuereinheit 3 kann auch bevorzugt in mehreren Teilsteuereinheiten ausgeführt sein, die mit einzelnen Bauteilen der Vorrichtung verbunden sein können.

[0036] Auf diese Weise ist ein neues und vorteilhaftes Verfahren und eine Vorrichtung zur vollständigen Korrektur von Sehfehlern des menschlichen Auges angegeben worden. Es wurden Kombinationen von Meß- und Bearbeitungsverfahren angegeben, welche in ihrer erfindungsgemäßen Anwendung die vollständige Korrektur des menschlichen Auges ermöglichen. Dabei werden Meßverfahren eingesetzt, welche die Oberfläche der Cornea präzise erfassen können und auch die im weiteren Strahlengang bis zur Netzhaut entstehenden Abbildungsfehler registrieren. Die rechnergestützte Auswertung dieser Meßergebnisse ergibt in Verbindung mit der Berechnung ideal korrigierter Augenlinsen (beispielsweise nach Katarakt-Operationen) oder ideal korrigierter Corneaoberflächen die Möglichkeit, bevorzugt mit einem Spot-Scanning-Excimerlasersystem topographiegestützt eine patientenspezifische Linse herzustellen und/oder die Hornhaut ideal korrigierend zu formen.

[0037] Insbesondere kann die Korrektur über die Modifikation eines Elements des optischen Systems erfolgen. So reicht es zur Verbesserung des Sehvermögens eines Patienten mit grauem Star und einer Fehlsichtigkeit aus, die intraokulare Linse vollständig zu korrigieren. In einem solchen Fall ist es nicht mehr erforderlich, neben der Katarakt-Operation noch eine refraktive Operation durchzuführen.

[0038] In Fig. 2 eine schematische Darstellung einer An-

ordnung zur separaten Sehfehlererfassung (Fig. 2a) und einer Anordnung bei Superposition aller Fehler (Fig. 2b) dargestellt. Hierbei ist das optische System mit dem Auge und vier optischen Elementen dargestellt. Mit diesen optischen Elementen können nun einzelne Sehfehler korrigiert werden, indem die einzelnen optischen Elemente spezifisch zur Korrektur einzelner Sehfehler eingesetzt werden. So kann beispielsweise mit dem ersten optischen Element eine sphärische Aberration korrigiert werden, mit dem zweiten optischen Element ein Astigmatismus kompensiert werden und mit dem dritten optischen Element eine Koma ausgeglichen werden. Hierzu können die einzelnen optischen Elemente nacheinander mit den durch die Korrekturparameter ermittelten Schußpositionen bearbeitet und individuell umgeformt werden. Bevorzugt wird nach jeder (Teil-)Korrektur ein Sehtest durchgeführt, um die Veränderung auch subjektiv überprüfen zu können.

[0039] In Fig. 2b ist hingegen dargestellt, wie eine Superposition aller Fehler auf einem optischen Element wirken würde und wie die oben angedeutete Kompensation im unteren Fall auf das eine optische Element übertragen werden müßte bzw. am Ende übertragen wird. Nachdem nämlich die einzelnen Korrekturen der einzelnen optischen Elemente festgelegt wurden, lassen sich diese auf ein provisorisches optisches Element übertragen. Die Schußpositionen, die dieser Korrektur zugrunde liegen, können dann in einem weiteren Schritt auf beispielsweise die Cornea übertragen werden - auf das provisorische optische Element kann dann verzichtet werden.

[0040] Auf diese Weise ist eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Korrektur von Sehfehlern des menschlichen Auges bereitgestellt worden, die bzw. das elegant eine vollständige Korrektur aller refraktiven Sehfehler einschließlich der Aberrationen des Strahlenganges im fehlsichtigen Auge erlauben, wobei die einzelnen Fehler auch durch iterative Korrektur, bevorzugt auf einem oder mehreren provisorischen optischen Elementen vorab durchgeführt und von dem Betrachter beurteilt werden können, ohne daß bereits ein Eingriff am Auge stattgefunden hat.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Korrektur von insbesondere refraktiven Sehfehlern eines Auges (1), umfassend eine kohärente Lichtquelle (4), eine Strahlmodifikationseinrichtung (5) zur Formung und Ablenkung eines Strahles der kohärenten Lichtquelle (4) **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Wellenfrontanalyseeinrichtung (2) zur Analyse einer Wellenfront des Strahlenganges im Auge (1) vorgesehen ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich eine Topographieanalyseeinrichtung (2') zur Analyse der Oberfläche des Auges (1) vorgesehen ist.
3. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden auf eine Vorrichtung bezogenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß weiterhin eine Steuereinheit (3) zur Verarbeitung von Signalen der Wellenfrontanalyseeinrichtung (2) und/oder zur Verarbeitung von Signalen der Topographieanalyseeinrichtung (2'), und/oder zur Steuerung der kohärenten Lichtquelle (4) und/oder zur Steuerung der Strahlmodifikationseinrichtung (5) vorgesehen ist.
4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden auf

eine Vorrichtung bezogenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlmodifikationseinrichtung (5) so ausgebildet ist, daß mit dem Strahl eine Intraokularlinse und/oder eine Augenlinse und/oder die Cornea des Auges (1) und/oder eine Kontaktlinse und/oder eine Implantable Contact Lens und/oder ein Brillenglas bearbeitbar ist.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden auf eine Vorrichtung bezogenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß die kohärente Lichtquelle (4) ein Laser, insbesondere ein Spot-Scanning-Excimerlasersystem, ist.

6. Verfahren zur Korrektur insbesondere von refraktiven Sehfehlern eines Auges (1), insbesondere unter Einsatz einer Vorrichtung nach den vorhergehenden Ansprüchen, dadurch gekennzeichnet, daß der Strahlengang des Auges mittels Wellenfrontanalyse ermittelt wird; und

daß ein ideales optisches System berechnet wird, das zu einer Korrektur der Sehfehler des Auges (1) führen würde.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich die Topographie des Auges (1) analysiert wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das ideale optische System auf der Basis der aus der Wellenfrontanalyse und/oder der aus der Topographieanalyse ermittelten Daten bereitgestellt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß weiterhin Schußpositionen zur Herstellung des idealen optischen Systems mittels der aus der Wellenfrontanalyse und/oder aus der Topographieanalyse ermittelten Daten berechnet werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das alte optische System des Auges (1) zu dem berechneten idealen optischen System umgeformt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das optische System die Augenlinse und/oder eine Intraokularlinse und/oder die Cornea des Auges und/oder eine Kontaktlinse und/oder eine ICL und/oder mindestens ein Brillenglas umfaßt.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß einzelne provisorische Elemente, insbesondere Linsen, des idealen optischen Systems

in einem ersten Schritt zur Überprüfung des idealen optischen Systems hergestellt werden und in einem zweiten Schritt diese einzelnen Elemente durch andere entsprechend umgeformte Elemente, insbesondere die entsprechend umgeformte Cornea, ersetzt werden.

13. Ideales optisches System, das nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche und/oder mittels einer der Vorrichtungen gemäß den vorhergehenden auf Vorrichtungen bezogenen Ansprüchen hergestellt wurde dadurch gekennzeichnet, daß das optische System Elemente aus implantationsgerechten und/oder adhäsionsgerechten und/oder ablationsgeeigneten Werkstoffen, insbesondere Kunststoff oder Glas, umfaßt.

14. Ideales optisches System nach einem der vorhergehenden auf optisches System bezogenen Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß das optische System Elemente mit refraktiven und/oder diffraktiven Strukturen

umfaßt.

15. Element zur Verwendung in einem optischen System, dadurch gekennzeichnet, daß das Element refraktive und/oder diffraktive Strukturen aufweist.

16. Verwendung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche und/oder einer Vorrichtung gemäß einer der vorhergehenden auf Vorrichtungen bezogenen Ansprüchen zur vollständigen Korrektur eines Sehfehlers eines Auges.

10

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

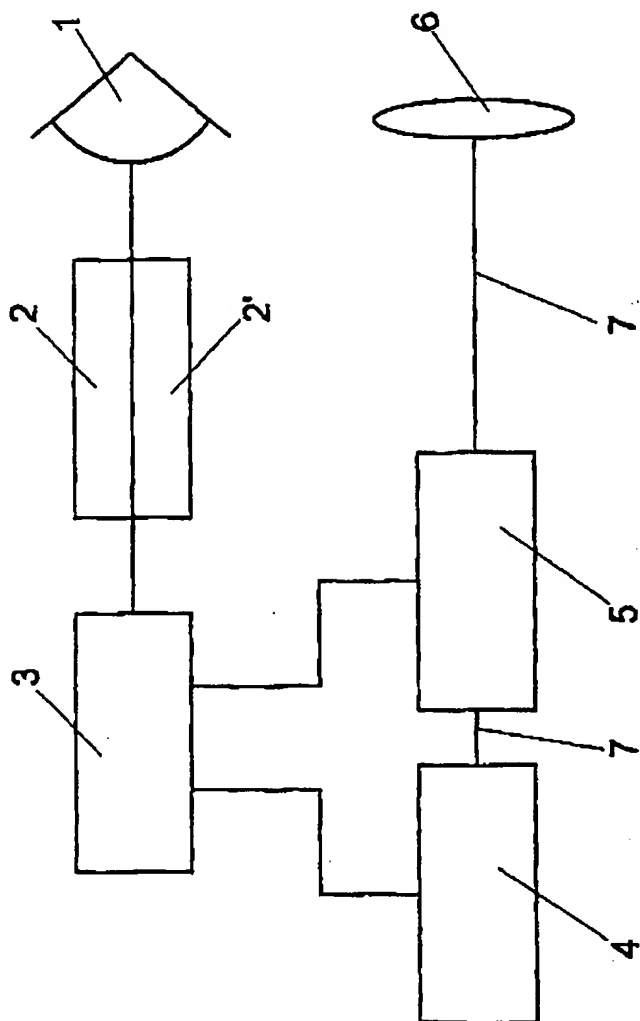


Fig. 1

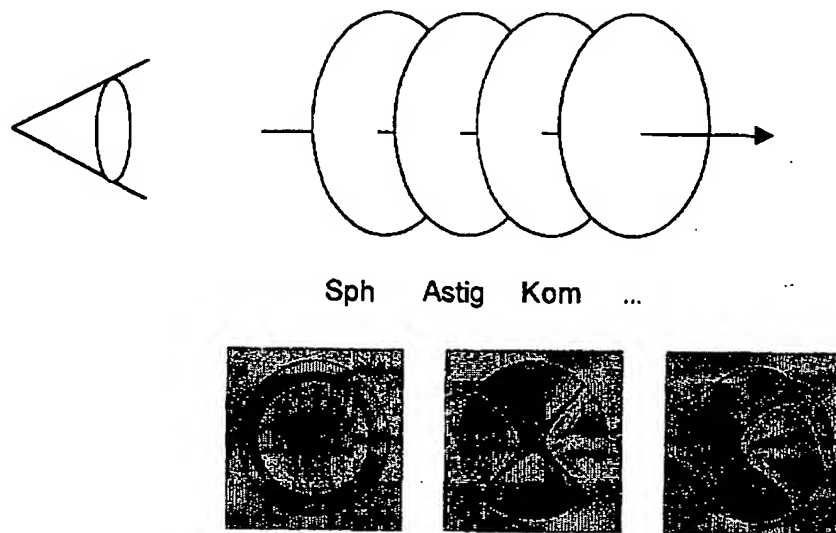


Fig. 2 a

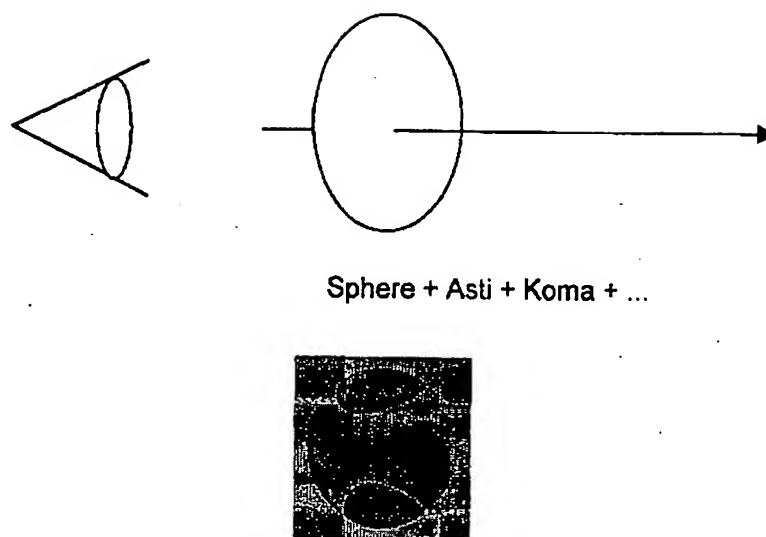


Fig. 2 b